



TITLE:

# リード木管楽器の人工吹鳴実験(音響系・光学系におけるカオス,研究会報告)

AUTHOR(S):

井戸川, 徹; 小畠, 時彦

---

CITATION:

井戸川, 徹 ...[et al]. リード木管楽器の人工吹鳴実験(音響系・光学系におけるカオス,研究会報告). 物性研究 1994, 62(5): 620-633

ISSUE DATE:

1994-08-20

URL:

<http://hdl.handle.net/2433/95370>

RIGHT:

## リード木管楽器の人工吹鳴実験

埼玉工大 井戸川 徹  
筑波大物工 小畠 時彦

### 1. はじめに

楽器は音楽の演奏のために人間が使用する。人間が使用するために、その長所欠点その他の性質の多くが感覚的に表現される。筆者は、リード木管楽器の挙動の科学的解明を目指して、人工吹鳴実験を行ってきた。バスーン(石橋他、1985)、(Shimizu, et al., 1989)、オーボエとソプラノサキソフオン(Idogawa, et al., 1991)、クラリネット(Idogawa, et al., 1993)、(Kobata, et al., 1993)の順に人工吹鳴が進められる間に、実験法、データ処理法は少しずつ進歩した。楽器についての理解も深まったが、同時に新たに解決すべき問題も現れた。解くべき問題が従来よりはかなりはっきりした部分もある。そう言う意味で前進があったと思う。

本報告は、上出の複数の論文に対する考察のようなものである。学会誌には通常記載されないような実験に関する詳細、現時点での問題点の整理、それに加えて少しばかりの推論を述べる。

### 2. 人工吹鳴の概要

演奏者ではなく、機械装置にリード木管楽器を吹鳴させ、それを人工吹鳴と呼ぶことにする。Fig. 1は人工の口の概略であるが、クラリネットあるいはソプラノサキソフオンのマウスピースを人工の唇に挟んだところを示している。この透明な箱の中の圧力を適切な値にすると、リード木管楽器は発音する。バスーン、オーボエとソプラノサキソフオン、クラリネットの順に人工吹鳴を進めたので、クラリネットの人工吹鳴時の実験技術が最も信頼できる。

Fig. 1にはクラリネットの人工吹鳴時に測定した種々の物理量の記号も示してある。最初のバスーンでは $P_0$ ,  $p(t)$ ,  $x(t)$ しか測定しなかったが、徐々に必要なことに気づいて測定量の種類を増した。吹鳴状態を表すパラメーターは $l$ ,  $x_0$ ,  $P_0$ である。この中 $l$ ,  $x_0$ は唇とリードあるいはマウスピースの関係を表す量であり、まとめて lip-adjustment と呼ぶこともある。 $P_0$ は吹鳴圧力と呼ぶ。楽器管体の中心軸が人工の口に対してなす角度もパラメーターであるが、これはできるだけ一定に設置した。したがって吹鳴条件は3つのパラメーター $l$ ,  $x_0$ ,  $P_0$ によって決定される。

人工吹鳴を行うときには、 $l$ ,  $x_0$ を一定に保ち、 $P_0$ を変化させ、 $p(t)$ その他の

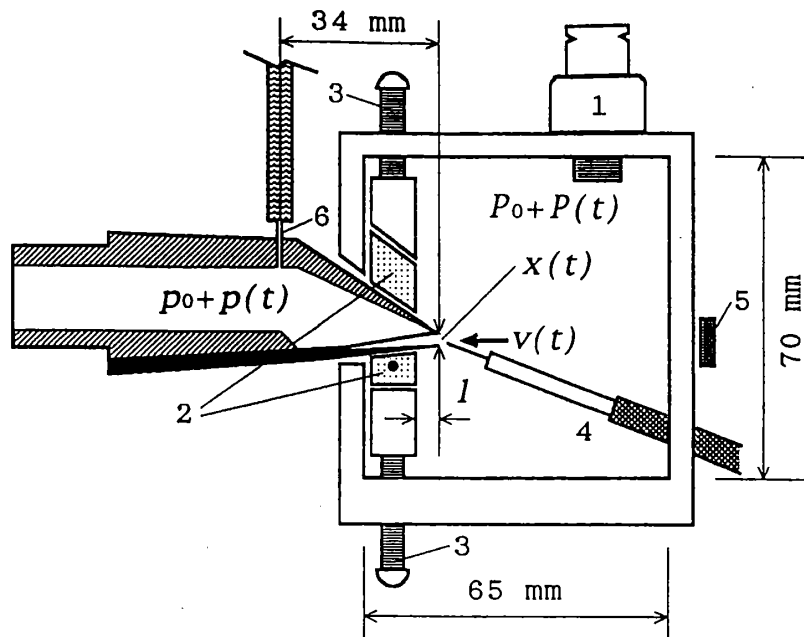


Fig. 1 人工の口の説明図。(1) 空気配管接続器具、(2) 人工の唇、  
(3) 唇圧力の調節ネジ、(4) 熱線風速計のプロブ、(5) フォトダイオード。

#### 記号の説明

$D(t) = \{p_0 + p(t)\} - \{P_0 + P(t)\}$  マウスピースと口内の圧力差

$F(t) = w \cdot x(t) \cdot v(t)$  リード開口部を流れる空気体積流量

$l$  リードが人工の口の中に突き出た部分の長さ

$p_0$  マウスピース内圧力の時間平均

$p(t)$  マウスピース内の圧力変化

$P_0$  人工の口内圧力の時間平均(吹鳴圧力)

$P_{th}$  気柱振動が励起される下限吹鳴圧力

$P_c$  気柱振動が励起される上限吹鳴圧力

$P(t)$  人工の口内の圧力変化

$v(t)$  リード開口部の空気流速

$V\{p(t)\}$  マウスピース内圧力の変化幅

$V\{P(t)\}$  口内圧力の変化幅

$w$  リードの幅

$x_0$  唇の圧力の下で静止しているリードの開口

$x(t)$  リード開口変化

$x(t) - x_0$  リードの変位

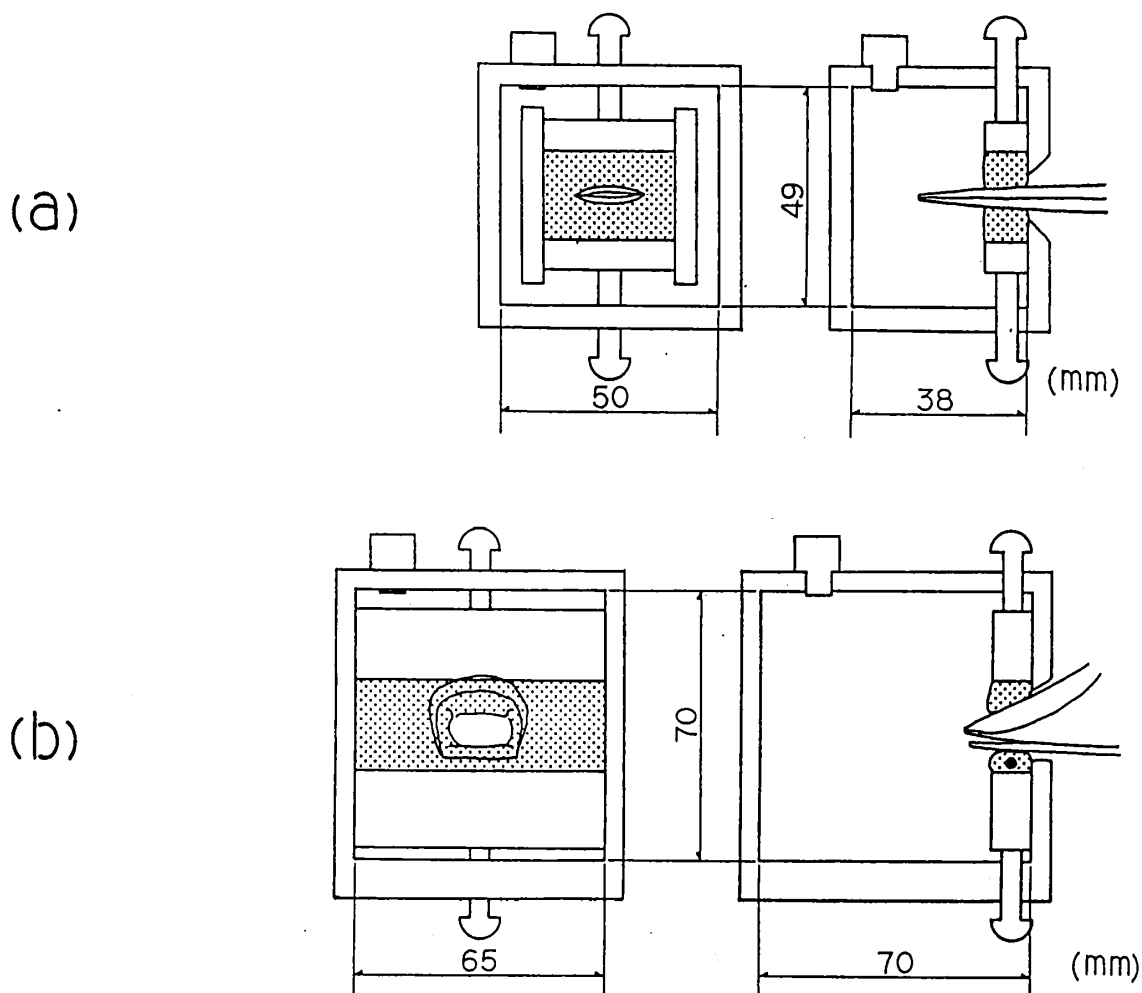


Fig. 2 実験に使用した人工の口および人工の唇。人工の口は、透明な厚さ5 mmの亚克力板で作られている。人工の唇はシリコンゴム（信越化学、KE114S）の硬さを調節して作る。

(a) バスーンおよびオーボエ用の人工の口。内容積は約  $8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ 。バスーンおよびオーボエのリードは小さいので、唇には切れ目を入れる程度で、特に成型は必要ない。

(b) クラリネットおよびソプラノサキソフォン用の人工の口。内容積は約  $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 。下唇の中には外径約3 mmの針金を入れてある。マウスピースはダブルリードに比較して大きいので、それが具合よくおさまるように、唇の成型が必要になる。

量を測定した。そして  $l$ ,  $x_0$  を他の値に設定しなおして一定に保ち、同じことを繰り返した。その結果、以下の事柄が明かになった。特に重要なのは (5)、(6) である。

(1) ある lip-adjustment の下で、 $P_{th} < P_0 < P_c$  の範囲で楽器は発振する。 $P_0$  が  $P_c$  を越えるとリードは全閉になる。 $P_0$  が  $P_{th}$  以下ではリードはかすかに振動するが、発音には到らない。

(2)  $P_0$  のある範囲内では、振幅が変化しまた振動数も僅かに変化するが、同じパターンの振動  $p(t)$ ,  $x(t)$  が観測される。 $P_0$  のこの範囲内では 1 つの振動状態が励起されているとみることができる。

(3) この範囲を越えて  $P_0$  を変化させると、突然他の振動状態に遷移する。

(4)  $P(t)$  は口中圧力の微小変化であるが、これはリードや楽器気柱に振動が励起された結果発生する。

(5) 一定の lip-adjustment の下で、 $P_{th} < P_0 < P_c$  の範囲で多数の振動状態が励起される。

(6) 一定の lip-adjustment の下で、 $P_0$  を上昇下降させるとき、同じ  $P_0$  の値に対して異なる振動状態が発生し得る。つまり振動状態遷移の列にはヒステリシスがある。

### 3. 人工の口

人工の口の容積をどのように決定するかについては、次の 2 通りの考え方がある。

(1) 容積を無限大にとると、常に一定の吹鳴圧力で木管楽器を吹鳴できる。したがって楽器本来の性質なり挙動が観測可能であろう。しかし口の容積を大きくすれば、口内圧力を速やかに変化させることはできない。(2) 演奏者の口の大きさとほぼ等しい容積にして、実際の演奏に近い状態を再現する。このときには、実際の演奏の場合に近い現象の観測を目的とするが、口やその上流に到るまで内壁の状態や構造までも演奏者をシミュレートするのはそれ程容易ではない。

実験に使用した人工の口の容積はダブルリード用で  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$  (Fig. 2 a)、シングルリード用で  $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3$  であり (Fig. 2 b)、後者は演奏者の口内容積よりも幾分大きめである。シングルリードの場合はマウスピースをくわえるので唇の部分、したがって口自体も大きめになる。人工吹鳴の際の測定データでは、口内圧力変化幅  $V\{P(t)\}$  は、マウスピース内圧力変化幅  $V\{p(t)\}$  に比較して、 $1/25 \sim 1/40$  程度である。この  $V\{P(t)\}$  が楽器の振動状態にどのような影響を及ぼしているのかは、今のところ不明である。人工の口の容積を少し位変化させても (例えば、 $3/4$  程度の容積にしても、また多少大きくしても)、人工吹鳴によって観測される現象には本質的な変化はなかった。

人工の唇は、シリコンゴムで作り、手触りで人間のその硬さに近いと思われる程度にした。人工の唇の硬さを丁度よく仕上げるには多少経験が必要である。唇はリードあるいはマウスピースを押さえるが、その圧力は、上唇の上方にあるネジ、下唇の下方にあるネジの両

方を用いて調節する。オーボエやバスーンの場合にはダブルリード自体が小型なので、Fig. 2 aに示すように唇の形は簡単で、1枚のシリコンゴムの板に切れ目を入れたようなもので十分である。クラリネットやソプラノサキソフオンの場合には、オーボエやバスーンのダブルリードに比較して、マウスピースが大きいので、それに具合よく接触するように唇の成型が必要である (Fig. 2 b)。また演奏者は、下唇を口の内側に入れ、下前歯にかぶせるようにしてリードをくわえると言うことなので、リードを押さえるシリコンゴムの中には太めの針金を入れたが、これはあまり効果はないものと判断される。

人工吹鳴にさいしては、人工の口と楽器の相対的位置関係が重要である。楽器および人工の口はともにアングルで組んだ枠に固定し、楽器の音孔は、少し大型のクリップ状のものとテープで固定することにより、すべて閉じてしまう。人工の口の位置を楽器に対して微調節した後、吹鳴圧力をかけて楽器を吹鳴する。人工の口がリードをくわえる深さ  $l$ 、振動していないリードの (唇の圧力下における) 開口  $x$ 。(唇とリードの間の接触圧力の測度でもある)に加えて、楽器の軸が唇に対してなす角度も重要なパラメータと思われる。我々はこの角度は終始できるだけ一定にして実験した。しかし実験者が変わると、この角度も変わるらしく、一連の遷移の列を構成する振動状態のすべてに同じものを得るのが困難になる。それではどの程度精密にこの角度を調節すればよいかと言う話しになるが、角度の測定を行わなかったので正確に表現はできないが、かなり微妙である。実験者が同じであれば、一度楽器を固定枠から外しても全く同じ遷移の列を得ることが可能であった。それでも6ヶ月も間をおくと、全く同じ固定枠を用いても、全く同じ遷移の列を得ることが不可能であった。その原因としては、唇の硬さが変化してしまっているのではないかと推測している。

#### 4. 測定

$P_0$ の測定には豊田工機の圧力変換器を用い、 $P(t)$ の測定にはBK社のプローブマイクロフォンを用いた。これら2つの測定器の細いプローブの先端部分は人工の口を開けた細い2つの孔をとおして人工の口内に挿入した。圧力変換器は直流から約600 Hzまでの周波数帯域でゲインを持ち、増幅器に付属した低域フィルタによりこの範囲内で遮断周波数を調節できる。

$p_0$ および $p(t)$ の測定器は、 $P_0$ および $P(t)$ の測定器と同じであるが、マウスピースやバスーンのリードは人工の口に比較して小さいから、2つの孔を空けて圧力変換器とマイクロフォンプローブを同時に挿入することは困難であった。オーボエのリードは極めて小さいので圧力測定を断念した。クラリネットの場合には、通常は $p(t)$ の測定のみを行い、必要に応じて、圧力変換器とマイクロフォンを差し替えて $p_0$ を測定した。 $p_0$ 測定の目的は、後に述べるように、楽器から人工の口に向かう空気の逆流が存在するか否かをチェックするためであった。 $p_0$ は、楽器内を流れる空気流量の平均値と管体の直流抵抗によって決まるかなり

小さい値であり、このような目的に対しては殆どの場合無視し得ることが知られた。

$p(t)$  あるいは  $P(t)$  の測定においては、マイクロフオンプローブに起因する遅れの補正が極めて重要である。1/2 インチ B K コンデンサーマイクロフオンには遅れがないものとして、それとプローブマイクロフオンの出力を B K のカップラーを用いて比較し、プローブマイクロフオンの周波数応答を測定した。 $p(t)$  や  $P(t)$  の測定値は計算機に記憶されているが、これを 1 度周波数領域に変換し、上記周波数応答によって補正した上で、再び時間領域に戻してやるとプローブマイクロフオンの遅れが補正できる。プローブマイクロフオンの周波数応答の測定データは他の報告（石橋他、1985）に示した。

リードが口の中に突き出ている部分の長さ  $l$  の測定値には、実験者によって異なる系統的誤差が含まれる。唇のどの部分に着目して  $l$  を測定するかがその原因であると思われる。この系統的誤差は 0.5 ~ 1 mm 程度である。1 人の実験者に限って言えば  $l$  の測定誤差はそれ程大ではない。

$x_0$  の測定は、人工の口を透明アクリル板で製作したので、接眼マイクロメーターを用いて容易に精度よく行い得た。 $x(t)$  の測定には光学的方法を用いた。バスーンの場合には管体が曲がっているので、振動するリード先端付近を横から平行光線で照明し、フォトダイオード上にその陰をつくると、リード振動を電気信号として取り出し得る。オーボエ、クラリネット、ソプラノサキソフオンの場合には管体がまっすぐなので、管尻に楽器からやや離れて光源をおき、そこから管体中をまっすぐにリードに向かって平行光線を発射した。この光線がリード開口を通過してフォトダイオードに達するようにしておくと、リード振動すなわちリード開口変化はフォトダイオードによって検出できる。リードの静止状態で調節ネジを使ってリード開口を変化させ、測定回路の出力と接眼マイクロメーターの読みを比較すると、この光学的測定法のキャリブレーションが可能である。光源を出た光線がリード内面で反射してリード開口を斜めに通過してフォトダイオードに到達するのを防ぐにはリード内面を黒く塗っておくのがよい。 $x(t)$  の測定法の周波数特性はフォトダイオードによって定まり、十分高い周波数域（20 kHz 以上）までゲインの低下や位相遅れは見られなかった。 $x_0$  および  $x(t)$  の測定は他の諸量の測定に比較して最も信頼がおける。

$v(t)$  は熱線風速計を用いて測定した。口から楽器に流れ込む空気の流量は  $w \cdot x(t) \cdot v(t)$  で表される。ただし、 $w$  はリードの幅である。熱線風速計のプローブを置く位置は Fig. 1 に示したようにリード開口直前の位置以外にはあり得ない。楽器の内部に置くと、熱線風速計は粒子速度を検出し、 $v(t)$  を測定することにはならない。リード開口直前にプローブを置いて、人工の口内部には種々の向きの流速が存在しうから、必ずしも楽器に流れ込む空気の速度が検出されるわけではない。また、プローブは、楽器に流れ込む空気流速と楽器から流れ出す空気流速とを区別できない。しかし、 $x(t)$ 、 $p(t)$  その他の測定値と比較してみると、 $v(t)$  の測定値は予想以上に信頼できることが知られた。そして後

に6節に述べるように、空気は常に口から楽器の方向に流れることが知られた。

木管楽器の挙動を知るための測定法の改良は一部可能であろう。 $v(t)$ の測定にレーザードップラー方式を用いれば向きまで含めた測定が可能であろう。 $x(t)$ の測定は現在のままでも満足できる。口の中とリードあるいはマウスピースの中との差圧 $D(t)$ を直接測定すればよりよい精度で $x(t)$ と $D(t)$ の関係を議論できるであろう。しかしマウスピースもリードも小さいものであるから多くの測定プローブを取り付けることは困難である。パラメーター $l$ は、唇とリードの接点を明確に定め得ないから、それ自体が明確な量ではない。したがってよりよい測定の可能性は少ない。 $l$ に代わるパラメーターも発見できそうにない。 $x_0$ の測定は現状でよいが、これは本来は唇とリードの接触圧力を測定する代わりのものである。しかし接触圧力の測定の実現の可能性は極めて薄いと思われる。

## 5. 空気系

人工の口に空気圧力を供給する空気系の細かい点について述べておこう。空気圧縮機の出口には高圧タンクを設け（我々の場合にはゲージ7気圧）圧縮空気を溜める。このようにすれば、圧縮機の運転に伴う脈動流を避けるために、圧縮機をしばらく停止させて人工吹鳴を続行できる。タンク出口には減圧弁をおいてそこから下流の圧力を粗調節する。さらに圧力の微調節を行うために、一種の圧力調節弁を試作したが、この弁は空気を放出しながら圧力の調節を行う所謂 bleed type にした。これによりリードが完全に閉じていても空気が放出されるので人工の口の中の圧力が上昇しすぎることがない。

バスの人工吹鳴を行う初めの頃にはケーンリードを用いたが、吹鳴用空気系統に湯沸かしに似たものを設置して水蒸気を発生させ空気に加湿する必要があった。さもないとリードが乾燥して振動が励起されなかった。水蒸気の発生が過多になると人工の口の内面に水滴が付着して内部が見えなくなった。空気に十分加湿してしかも人工の口を透明に保つのはかなり面倒なことで、間もなく、プラスチックのバスリードを用いることにし、加湿器を設ける手間を省いた。その後オーボエ、サキソフオン、クラリネット何れもプラスチックリードで吹鳴した。

吹鳴用空気系については、人工の口の容積を大きくしてみるとよい。Hirschberg 他(1991)はリード部分の空気の流れの可視化について研究している。彼らは人工の口は理想的には無限大にすべきだと主張する。演奏者と管楽器の相互干渉については、Backus (1985) や Sommerfeldt 他(1988)の研究がある。

## 6. 従来の2つの仮説と実験結果

### 2つの仮説

クラリネットの発音機構に関連してこれまでは以下の2つのことが仮定されあるいは



信じられて来た。

(1) リード変位  $x(t) - x_0$  は、少なくとも低周波数の振動においては、リードの両面にかかる圧力の差

$$D(t) = \{p_0 + p(t)\} - \{P_0 + P(t)\}$$

に比例する。

(2) 横軸に  $p$ ，縦軸に  $F$ （口から楽器に流れ込む空気流量）をとるとき、 $p$  と  $F$  の関係は上に凸な関数で表される。

リード木管楽器の動作はサキソフオンであれオーボエやバスーンであれ、シングルリードとダブルリードの差を除けば、似たようなものであるから、リード木管楽器についてはこれらのことが暗黙の中に了解されていたと考えてよいであろう。

上記(2)については少しつけ加える必要がある。McIntyre他(1983)の報告には、 $p$  の低い部分ではリードが完全に閉じて  $F$  が 0 になり、 $p$  が高くなるにつれて  $F$  は大きくなり、その最大値を越えてさらに  $p$  が増加すると  $F$  は次第に減少し、 $p$  が  $P_0$  よりも大となる部分では  $F < 0$  となる図が示されている。Benade(1976)の著書には、上に凸な曲線の一部、つまり  $F$  の値が最大値に近い部分のみが明瞭に描かれていて、 $F$  が 0 に近い部分には曲線が描かれていない。

#### 実験結果／ $p(t)$ と $x(t)$

クラリネットが周期的振動状態にあるとき、 $p(t)$  と  $x(t)$  の測定値を用いてリサージュ図形を描くと、約 1000 Hz を境にして、それ以下の振動状態ではほぼ 1 本の線になり  $p(t)$  と  $x(t)$  の間には位相差が認められないが、1000 Hz 以上ではリサージュ図形が丸みを帯びてきて、1100 Hz で  $p(t)$  に 10 度程度の位相遅れが認められる。この位相差が  $p(t)$  と  $x(t)$  の真の位相差か、あるいは  $p(t)$  測定における遅れに基づくものかは確定できない。遅れに関係した事柄を列举すると、(1) プローブマイクロフォンの遅れの補正が高周波数領域までは十分には行い得ない、(2) クラリネット用のプラスチックリードの共振が 800～1000 Hz にあり、(3) リード先端と  $p(t)$  測定位置の間には 34 mm の距離がある。

#### 実験結果／空気流の向き

通常、空気流は口から楽器に向かうが、逆に楽器から口に向って空気は流れるであろうか。熱線風速計は空気の流れる向きを検出できない。クラリネットの人工吹鳴においては  $p(t)$ ， $x(t)$ ， $v(t)$  に加えて  $p_0$ ， $P_0$  を測定したので、逆流が存在しないことを確かめることができた。 $D(t) < 0$  であれば空気流の向きは口から楽器に向かい、 $D(t) > 0$  であれば楽器から口に向かう。クラリネットに関する我々の実験結果に限って言えば、大部

分の場合、 $D(t)_{\max} < 0$  であることが確かめられるので空気流は口から楽器に向かう。そしてわずかの例で  $D(t)_{\max} \approx 0$  となったが、 $p_0$ 、 $P_0$ 、 $p(t)$ 、 $x(t)$ 、 $v(t)$  の測定値を詳細に検討すると、この場合にも、空気流の向きは口から楽器の方向にあった。結局、空気流の向きは常に口から楽器の方向にあることが確かめられた (Kobata et al., 1993)。

## 7. 楽器以外の共鳴気柱の人工吹鳴

我々は通常の木管楽器以外に、下記のものも人工吹鳴してみた。

### (1) 長さ内径共にバスーンに近い円錐気柱。

バスーンのリードで吹鳴するとき、基本的には  $B^{\flat}_1$  の音を発生する。励起される気柱振動はバスーンのそれに比して極めて安定であった。そして発生される音は楽器と言うよりはむしろ機械のそれに近かった。

### (2) 音孔を開けてないソプラノサキソフオン。

基本的にはピッチ  $G^{\sharp}_3$  に近い音を発生する。ソプラノサキソフオンに比して準周期的振動が励起され易い。

### (3) 円柱気柱 (長さ 518 mm, 内径 14.5 mm)。

クラリネットのマウスピースで吹鳴するとき、発生する音のピッチは基本的には  $D^{\sharp}_3$  に近い。クラリネットに比して準周期的振動が励起され易く、また、リードが破損し易い。

### (4) 頂角がバスーンのそれに近い円錐気柱 (長さ 630 mm)。気柱の形状はクラリネットとソプラノサキソフオンの中間にある。

ソプラノサキソフオンのマウスピースで吹鳴した。一定な lip-adjustment のもとで  $P_0$  を変化させるとき、振動状態が連続的に変化し、明確な突然の遷移が認められない領域が存在した。パラメーター ( $l$ ,  $x_0$ ,  $P_0$ ) の値の組み合わせによっては、マウスピース内音圧波形がソプラノサキソフオンのそれに近く、あるいはクラリネットのそれに近いこともあった (Idogawa et al., 1991)。つまりこのような気柱には、楽器として持つべき個性を与え難いと考えられる。

これら単純な円柱や円錐気柱あるいは音孔のない楽器共鳴管を吹鳴する場合には、楽器では通常起こり得ない挙動や挙動の複雑さあるいは性格の曖昧さが見られた。

楽器に話しを戻すと、楽器には明確な性格がある。クラリネットはクラリネットらしいし、バスーンはバスーンらしい。またそれらの挙動はある程度複雑であるが、単純な円柱や円錐気柱はもう少し複雑な挙動を示す。楽器が未完成であると考えれば、極力複雑さを除いたがまだこれだけの複雑さを取り除き得ないでいることになる。楽器が完成していると考えれば、楽器はある程度複雑な挙動を示すべきではあるがあまりに複雑に過ぎないように押さえてあると言える。その何れであるのかは不明である。

## 8. 良い音から悪い音へ

木管楽器の人工吹鳴実験を最初に行ったのは Backus (1960) であるが、クラリネットの人工吹鳴に関する論文のなかで「木管楽器の音響学的基礎はよく知られていないし、特に、リード自体の挙動とその気柱振動との関係に着目した人がいない」と述べている。彼は様々な運指に対して  $p(t)$  と  $x(t)$  を同時に測定しその波形を示したが、注目すべきことは人工吹鳴によって良い音質が得られた場合のみを取り上げていることである。すべての場合を測定対象に含めることは不可能であるから、何らかの制限の範囲内で観測を実行することはやむを得ない。

我々の人工吹鳴実験も、Backus にならって、最初はバスーンの様々な運指について、音質が良いと判断される場合のみを取り上げ、 $p(t)$ 、 $x(t)$  を同時に測定した(石橋他、1985)。石橋は、演奏家ではないが、管楽器演奏の豊富な経験を持っていた。

バスーンの管体はよく知られているように180度曲がっている。この影響が吹鳴波形に見られないかを調べるのが直井の役目であった。演奏の経験のない彼は、まっすぐな円錐気柱をバスーンのリードで吹鳴し、一定の  $l$ 、 $x_0$  の下で  $P_0$  を上昇下降させ、 $p(t)$  と  $x(t)$  を極めて丹念に観測し、次の重要な2つの事実を発見した。(Shimizu et al., 1989)。

(1) 一定な  $l$ 、 $x_0$  の下で  $P_0$  を上昇下降させるとき、 $P_0$  の値に依存して多くの種類の周期的な  $p(t)$  および  $x(t)$  が励起される。多くの種類の振動状態の中でいわゆる良い音はただ1つの振動状態で得られ、他の状態では不満足なあるいは聴くに耐えない音も発生される。

(2) 3次元空間( $l$ 、 $x_0$ 、 $P_0$ )内の1点において励起される振動状態は複数存在し得て、その中の何れが励起されるかはその点に到達する経路に依存する。一定の  $l$ 、 $x_0$  の下で  $P_0$  を上昇下降させるときには、同じ  $P_0$  においても異なる振動状態が観測され、ヒステリシスとなって現れる。

同じ頃クラリネットの演奏経験のある清水はソプラノサキソフオンの人工吹鳴に従事していたが、上記直井の結果に刺激され、ソプラノサキソフォンについても同様な結果を得た。さらに清水は頂角がバスーンのそれに近い円錐管(長さ630mm)をソプラノサキソフオンのマウスピースで吹鳴し、この共鳴気柱がソプラノサキソフォンとクラリネットに跨る性質を持つことを発見した(Idogawa et al., 1991)。すなわち、(1) lip-adjustment によってクラリネットの場合に近い  $p(t)$  波形が得られたりソプラノサキソフォンに近い  $p(t)$  が得られたりする。即ち、この共鳴管に固有の性格が明瞭でない。(2)  $l$ 、 $x_0$ 、 $P_0$  の値によっては、準周期的  $p(t)$  波形が得られる。

岩城はその頃クラリネットの人工吹鳴において多くの非周期的  $p(t)$  波形を得ていた(Idogawa et al., 1993)。

木管楽器の人工吹鳴実験の軌跡をたどって見ると、いわゆる良い音だけでなく調子外れなあるいは非周期的音も観測の対象として取り上げるまでには回り道を経る必要があった。

「楽器の吹鳴である」と言う先入観が客観的であるべき物理学的観測を狂わせていた。例えばオーボエはオーボエらしい音を発生する筈であるからそれに似つかわしくない音は誤った実験の結果として切り捨てていた。演奏の経験のない者の観測、あるいは楽器ではない共鳴気柱の吹鳴をきっかけにして周期的音に加えて非周期的音が観測の対象となって行った。

## 9. 多様な振動状態とヒステリシス

第2節に人工吹鳴の結果見いだされたことの概略を述べた。一定の  $l$ ,  $x_0$  のもとで吹鳴圧力を変化させるとき多くの振動状態が励起され、その個々の振動状態はその領域内では安定であるが、その領域を越えて吹鳴圧を変化させると、他の振動状態へ突然遷移する。楽器についてではないがこれに類似な現象の例は、カオスの良い入門書である Berge (1984) らの著書に扱われていて、始めてそれを読んだときには同書が木管楽器の物理学のために書かれたと言う錯覚に陥りそうであった。

何故楽器はこのように多くの振動状態で発振する必要があるのかについて考えてみよう。バスーン、オーボエ、ソプラノサキソフオンにおいては、所謂よい音の発振領域は、振動励起可能な  $P_0$  の最も低い範囲つまり  $P_{th}$  に最も近いあたりにある。しかし  $P_0$  を 0 から次第に増加させるとき、多くの場合、 $P_{th}$  よりは幾分高めの値で始めて振動が発生し、しかもそこでは良い音の 2 あるいは 3 倍の高調波が励起される。したがって、よい音を得るには、1 度高い音を発生させた後に、 $P_0$  を減少させる必要がある。リード木管楽器の演奏には、よく知られているように、タンギング (Baines, 1957) が用いられるが、そのときには口の中の圧力が一度にリードに加えられ、その後圧力が低下すると考えられる。つまり、タンギングは  $P_0$  が高い値で吹鳴を開始し、その後に圧力を下げる操作を瞬時に行っていると推察できる。ストレイネージをソプラノサキソフオンのリードに貼り、演奏者がタンギングを用いるときのリード振動を観測した (Idogawa et al., 1991) ところ、リード振動開始時に 3 倍高調波に富んだ振動が短時間継続した後、基本周波数のリード振動が観測された。それに反し、タンギングを用いないときには、基本振動数のリード振動振幅がゆるやかに増大して定常値に達した。この場合には、音の立ち上がりの歯切れが悪いことは言うまでもない。平均律音階に対応する振動数の  $Q$  の高い複数の音原を用いて音楽を演奏したとすれば、歯切れの悪い音楽になるであろうことは容易に想像できる。そこで、電子楽器では音の立ち上がりの部分に、個々の企業は独自の特別な工夫をしているに違いない。そのデーターは知るよしもない。

一定の  $l$ ,  $x_0$  のもとで吹鳴圧力を上下させるとき、同じ  $P_0$  でも、その上昇時と下降時に励起される振動状態が異なる所謂ヒステリシス現象についての説明は未だなされていない。木管楽器の吹鳴条件は  $l$ ,  $x_0$ ,  $P_0$  によって定まる。楽器と人工の口との相対的位置さえ変化しなければ、 $P_0$  の他には、我々の人工吹鳴実験では吹鳴条件を変える要素はない。3 次元空間 ( $l$ ,  $x_0$ ,  $P_0$ ) の中の 1 点において複数の振動状態が可能であると言う判断に誤りがあると

すれば、 $P_0$ の上昇下降を行う間に唇とリードの相対的位置がずれてしまうことが考えられる。しかし振動状態の遷移が起こるときに唇部分を拡大観測しても唇のずれは認められなかった。さらに、一定の $l$ ,  $x_0$ の下で $P_0$ を上下させるときに、何度でも全く同じ振動状態遷移の列を観測することができた。これは、唇とリードの相対的位置のスリップによって振動状態の遷移が起こるとすれば、極めて考え難いことである。バスーンを模した円錐気柱の吹鳴においては、鉛筆の先端で唇を故意に相当程度押しても遷移は発生しなかった。

#### 10. 問題の整理 — 理論への期待

クラリネットの人工吹鳴実験の結果において確認された以下の3項目 (Kobata et al., 1993) は今後の研究課題であろう。

(1)  $p(t)$  と  $x(t)$  は周期的波形の場合にはよく比例するのに、非周期的波形ではお互いに無関係な振舞いをする。この理由は不明である。しかし、 $x(t)$ ,  $v(t)$ ,  $P(t)$  波形の間には、周期的であれ非周期的波形であれ、定性的には相関が認められた。

(2) リード運動は、殆どの振動状態において、マウスピースあるいは唇の何れかにより、あるいはこれら両者によって制限される。リード運動がどのように制限されるかは lip-adjustment と関係があるように見えるが、その関係が如何なるものかは明瞭ではない。小数の例においては、リード運動が唇あるいはマウスピースの何れによっても制限されなかった。

(3) 唇の圧力を受けつつマウスピースの上でリードが如何なる運動をするのかについては、より詳しい研究が必要である。

我々の実験装置を用いる限り、これまでに述べてきた研究成果以上のことはあまり期待できない。例えば、ある振動状態において、 $x(t)$  を low-pass filter に通すと  $p(t)$  が得られるように見える。この low-pass filter の特性を知り得れば楽器の発音機構の決定に役立つ筈である。これは、多くの周期振動波形データの整理によって、原理的には可能な筈であるが、測定データからは明確な結論は得られなかった。そのような low-pass filter は存在しないのかも知れない。あるいは実験装置や測定器の精度を高めれば  $p(t)$  と  $x(t)$  の関係を確認できるかもしれないし、さらに、リード運動の制限がマウスピース側になるか唇側になるかについて原因を突き止め得るかも知れない。実験器材の性能向上の他には、楽器の構造をより大胆に故意に変えて実験してみるのも1つの方法であろう。

非線形振動理論は木管楽器の理解を大きく変えた。これまでも楽器は非線形系として理解されてきたが、カオス振動に関連した理論に沿った理解の仕方が不可欠であろう。吹鳴状態を表すパラメータを変化させたとき振動状態が突然に遷移したり、状態遷移の列にヒステリシスが現れたりする我々の実験結果を安心して眺めるためには、カオスの本 (例えば、Berge et al., 1984) を読む必要があった。

Maganza et al.(1986)は、McIntyre et al.(1983)の Appendix A を発展させ、クラリネットを吹鳴するかわりにそのマウスピース部分を3次の電気回路でシミュレートした系において period doubling route to chaos を示した。筆者らは Schumacher (1981) の方程式において、実際とはかなり異なるパラメーターの値を選んではいるが、period doubling route to chaos が存在することを本号の別の論文に示した。我々の実験結果ではクラリネットには period doubling route to chaos は見られず、多くの準周期的気柱振動が発見された。これまでの理論にはどこかクラリネットの実態を把握していないところがあると思われる。

現在のところ、私見によれば、リード運動に関する知見にもっとも大きな弱点がある。リードは唇の圧力の下でマウスピースの上で振動する。簡単な2階の方程式で記述できる筈がない。さらにリード開口を流れる空気流についても、さらに追求が必要であろう。

オーボエの複雑な振動状態遷移図は、特定のリードを用いて唇(の形状と硬さ?)がある状態のときに得られたものであり、そのときは、楽器を取り外しセットしなおしても、同じ遷移図が何度でも繰り返し得られた。しかし約6ヶ月後には(唇の状態が変化して?)2度と得られなかった。唇やリードのこのような細かい性質までも定量的に理論に反映させることは可能であろうか?それが不可能であるとしても、木管楽器の適切なモデルが得られればパラメーターの変化に際して楽器の挙動がどの方向に変化するかを定性的に予測することは可能であろう。木管楽器のような物理系において、パラメーターの値あるいはその変化によって、

(4) 多くの周期的、非周期的振動状態が励起されうること

(5) 振動状態遷移の列にヒステリシス現象が存在すること

を理論的に示すことは最も興味ある問題である。

## 11. おわりに

筆者の楽器研究の目的は常に何よりも楽器の挙動の理解にあり、よい楽器を作ると言った実際の面とは何の関わりもなかった。また研究の先を急ぎ過ぎた傾向もあった。実験についてなるべく詳細に報告するのを目的にした本報告の記述は内容の性格上脈絡に乏しいものになったかも知れない。これから木管楽器の実験を始める方の参考になれば幸いである。

研究会は池田研介教授や高橋公也助教授のご尽力で大変興味深いものになった。折角の機会を文章に残すご配慮にもお礼を申し上げる。人工吹鳴の実験に携わった筑波大学のかつての大学院生、石橋雅裕、直井敏勝、遠藤(清水)道子、小室孝治、岩城正和の諸氏にも感謝する。

## 参考文献

Backus, J. (1960). "Vibrations of the reed and the air column in the clarinet,"  
J. Acoust. Soc. Am. 33, 806-809.

- Backus, J. (1985). "The effect of the player's vocal tract on woodwind instrument tone," J. Acoust. Soc. Am. **78**, 17-20.
- Baines, A., (1957), "Woodwind Instruments and their History," Faber and Faber, London.  
奥田恵二訳、木管楽器とその歴史、音楽の友社、p. 27.
- Benade, A. H., (1976), "Fundamentals of Musical Acoustics," Dover, New York, p. 437.
- Berge, P., Pomeau, Y., and Vidal, C., (1984), "Order within Chaos," John Wiley and Sons, New York.
- Hirschberg, A., Gilbert, J., Wijnands, A. P. J., and Houtsma, A. J. M. (1991). "Non-linear behavior of single-reed woodwind instruments," Nederlads Akoestisch Genootschap, No. 107, pp. 31-43.
- Idogawa, T., Shimizu, M., and Iwaki, M., (1991). "Acoustical behavior of an oboe and a soprano saxophone artificially blown," in Proc. of the Symposium on Some Problems on the Theory of Dynamical Systems in Applied Sciences, vol 10, World Scientific, Singapore.
- Idogawa, T., Kobata, T., Komuro, K., and Iwaki, M. (1993). "Nonlinear vibrations in the air column of a clarinet artificially blown," J. Acoust. Soc. Am. **93**, 540-551.
- 石橋雅裕、井戸川徹、(1985)、"バスーンにおけるリードの振動とボーカル入口音圧" 日本音響学会誌、**41**, 11, 752-758.
- Kobata, T., and Idogawa, T. (1993). "Pressure in the mouthpiece, reed opening, and air-flow speed at the reed opening of a clarinet artificially blown," J. Acoust. Soc. Jpn. (E). **14**, 417-428.
- Maganza, C., Causse, R., and Laloe, F. (1986). "Bifurcations, period doublings and chaos in clarinet-like systems," Europhys. Lett. **1**(6), 295-302.
- McIntyre, M. E., Schumacher, R. T., and Woodhouse, J. (1983). "On the oscillations of musical instruments," J. Acoust. Soc. Am. **74**, 1325-1345.
- Schumacher, R. T. (1981). "Ab initio calculations of the oscillation of a clarinet," Acustica **48**, 71-85.
- Shimizu, M., Naoi, T., and Idogawa, T. (1989) "Vibrations of the reed and the air column in the bassoon," J. Acoust. Soc. Jpn. (E) **10**, 5, 269-278.
- Sommerfeldt, S., and Strong, W. (1988). "Simulation of a player-clarinet system," J. Acoust. Soc. Am. **83**, 1908-1918.